

文章编号: 2097-1974(2025)02-0093-06 DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20250212

# 灵活、经济、高效的新型商业运载火箭测发控系统设计

王芳, 齐欢, 刘伟, 孙立猛  
(北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

**摘要:** 卫星互联网正成为全球竞争的“新战场”, 随着中国星网+G60星链建设推进, 运载火箭商业发射具有巨大的市场空间。商业应用下, 中国运载火箭研制、生产、发射呈现出从固定发射场发射、定制化研发、以月计算的发射准备时间向海上随机点位发射、批量化生产、以天计算的发射准备时间转变的发展趋势。提出一种基于异构组网+SDN管控的陆海通用无线测发控系统架构, 以及移动方舱式测发控系统一体化设计。针对商业航天研制快速响应、经济高效、高可靠性、环境适应性强的需求, 提出基于系统解耦、测试整合和自动判读的快速工作流程方法, 和以“商”助“商”通用硬件采购+专用软件研发、系统可靠性提高代替单机可靠性保障、地面一体防护代替个体适应的系统集成方法, 实现经济性与可靠性的平衡。在此基础上, 从箭地功能集成化、远程辅助测发、低成本测发模式、可回收火箭测发控、先进技术应用5方面阐述测发技术发展趋势。

**关键词:** 商业发射; 陆海通用; 无线测发; 快速流程; 系统集成

**中图分类号:** V55 **文献标识码:** A

## The Design of Flexible Economic Efficient New Test and Launch Control System for Commercial Launch Vehicle

WANG Fang, QI Huan, LIU Wei, SUN Limeng  
(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing, 100076)

**Abstract:** Satellite Internet is becoming the new battlefield of global competition. With the development of Chinese satellite network and G60 satellite chain, there is a huge market space for commercial launch of launch vehicles. Under the commercial application, the design, production and launch of Chinese launch vehicle show the trend from fixed launch site, customized research and months of preparation time to random launch site, mass production and several days of preparation time. A heterogeneous network and SDN management based wireless test and launch control system architecture universal for land and sea is proposed, and the integrated design of mobile cabin based test and launch control system is presented. Aiming at the requirements of rapid response, economic efficiency, high reliability and strong environmental adaptability of commercial aerospace, a fast workflow method based on system decoupling, test integration and automatic interpretation is proposed, and a system integration method based on assisting business with commercial general hardware procurement and special software development, improvement of system reliability replacing equipment reliability and ground integrated protection replacing individual adaptation is proposed to achieve a balance between economy and reliability. On this basis, the trend of test and launch technology is introduced from five aspects which are the integration of vehicle functions and ground functions, the test and launch technology with remote assistance, low-cost test and launch mode, test and launch control for recyclable rocket, and application of advanced technology

**Keywords:** commercial launch; universal for land and sea; wireless test and launch; fast workflow; system integration

### 0 引言

卫星互联网在全球覆盖、6G通信、特种通信等方面具有重要的战略价值, 正成为全球竞争的“新战场”。随着中国星网+G60星链建设的推进, 运载火箭作为卫星发射工具, 对其需求或将迎来爆发, 商业火

箭产业进入发展黄金期。近年来, 中国商业航天发射捷报频传。2022年, 中国共实施64次航天发射, 其中商业发射21次, 占比32.81%; 2023年, 中国共实施67次航天发射, 其中商业发射26次, 占比38.81%。商业航天已从初创期迈入快速发展期, 受益于卫星星

座建设, 预计未来10年市场空间将达千亿规模。

运载火箭陆上发射是一种传统运载火箭发射样式, 也是目前中国运载火箭主要发射样式。海上发射是一种新型、灵活、高效的发射模式, 利用发射平台在海上大范围移动的优势, 可灵活选择发射位置, 有效解决低倾角(0~60°)发射、航落区安全性等难题<sup>[1]</sup>。截至2025年1月, 中国已经成功实施15次海上发射, 以商业应用为主。海上发射已经成为商业发射的一种重要样式。

商业火箭产业的快速发展, 离不开测发控系统的支持。测发控系统是火箭发射过程中不可或缺的一部分, 负责火箭的测试、发射控制和数据处理。传统的测发控系统主要应用于固定发射场, 采用定制化设计, 系统研制成本高, 发射准备周期长, 难以满足商业航天快速、灵活、经济的需求。传统测发模式与商业测发模式区别见表1。

表1 传统测发模式与商业测发模式对比

Tab.1 Difference of test and control between traditional mode and commercial mode

指标	传统模式	商业模式
发射样式	陆上固定发射场	陆、海发射, 发射点位灵活
发射准备周期	数周至数月	数小时至数天
测发控网络架构	有线为主	有线或无线
成本控制	定制化硬件为主	商用硬件+专用软件

因此, 设计一种灵活、经济、高效的新型商业运载火箭测发控系统, 对于推动商业航天的发展具有重要意义。新型商业运载火箭测发控系统的设计必须充分考虑以下几点:

a) 快速响应。商业火箭的特点之一是能够快速响应市场需求, 迅速履约发射服务。这要求测发控系统具有简洁、高效的测试流程, 能够快速完成发射准备。

b) 经济高效。经济性是衡量商业火箭价值的重要因素。新型测发控系统需要在保证可靠性的前提下, 尽可能降低研制和使用成本, 提高系统的经济性。

c) 高可靠性。高品质是产品永恒的追求, 也是火箭系统建立良好信誉的基础。商业应用保障条件有限, 尤其是海上发射, 操作空间和携带替换设备均受到很大限制, 这要求测发控系统具有较高的可靠性和自愈能力。

d) 环境适应性强。不同发射位置地理跨度较大, 使用环境差异较大, 要求测发控系统具有较强的环境

适应性。

本文提出一种陆海通用测发控系统, 从工作流程设计、系统集成设计、系统可靠性设计等方面阐述商业模式下测发控系统设计关键技术, 并介绍未来测发技术的发展方向。

## 1 测发控系统发展现状

### 1.1 中国发展现状

运载火箭远距离测试发射控制(简称远控测发)是国内外运载火箭一种常用的测发模式。地面测发控设备分为前端和后端两部分, 前端部署在箭体附近, 后端部署较远, 二者距离一般在公里级, 并通过网络互联。岗位人员在后端接收前端设备采集的火箭状态数据, 并控制前端设备完成对火箭的测试和发射控制。

地面测发控各设备间以网络通信为主, 箭地主要采用有线方式互联, 多采用数字总线通信。供电采用控制、遥测、动力、总体网等分系统独立供电, 部分型号实现了数字式统一供电<sup>[2]</sup>。测发控系统设备以定制化产品为主, 多采用VXI、PXI、PLC等架构<sup>[3]</sup>。遥测数据通常通过PCM数据流实现箭地之间数据通信。数据处理和判读基于后端产品完成, 并实现部分自动化测试和自动数据判读。

测发模式方面, 陆上发射以有线测发为主, 即在前、后端分别构建局域网, 并在前、后端之间构建以光纤通信为主干链路的测发控网络<sup>[4-5]</sup>; 海上发射以无线测发为主, 即在前、后端分别构建局域网, 并在前、后端之间构建以无线通信为主干链路的测发控网络。无线测发具有覆盖范围广、响应速度快、灵活部署等特点, 是实施运载火箭海上发射的优选测发方式, 中国已经实施的10余次海上发射均采用无线测发。

与有线测发模式相比, 无线测发模式受无线通信不稳定、网络时延波动大等影响, 存在指令丢失、网络中断等风险, 如何在不稳定网络中确保多业务传输服务质量(Quality of Service, QoS), 是无线测发控系统需要重点解决的问题。

### 1.2 国外发展现状

以SpaceX为代表的国际商业航天公司, 其测发控系统设计具有以下特点:

a) 快速发射准备: SpaceX的Falcon 9火箭实现了快速发射准备, 从火箭进场到发射只需要几天时间。这得益于高度自动化和简化的测发控系统设计,

减少了人工干预，提高了发射效率。

b) 海上回收技术: Falcon 9火箭成功实现了海上回收，测发控系统需要支持火箭回收后的快速评估和再使用。这要求测发控系统具有更高的灵活性和适应性，能够在短时间内完成复杂的测试和评估流程。

c) 自动化程度高: SpaceX的测发控系统高度自动化，通过先进的软件算法和智能控制系统，减少了人力成本，提高了系统的可靠性和安全性。

## 2 陆海通用测发控系统

### 2.1 测发控系统网络架构

本文提出一种基于异构组网+软件定义网络(Software Defined Network, SDN)管控的陆海通用测发控系统架构。如图1所示，陆海通用测发控系统包括前端和后端两部分，前端为发射平台，后端为指挥平台，实现火箭远控测发。

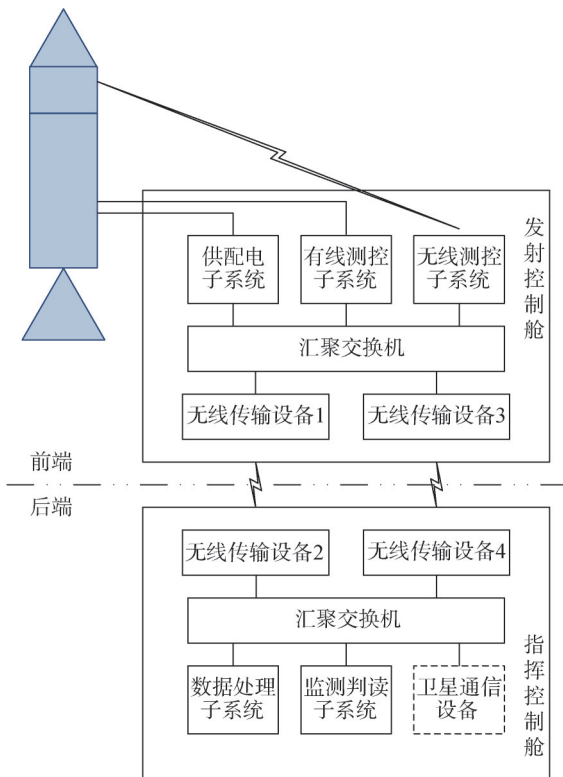


图1 测发控系统架构

Fig.1 Architecture of test and launch control system

a) 前、后端分别部署汇聚交换机，支持火箭系统、测发控终端、监控终端等通过有线或无线方式接入，完成前端（或后端）内部信息交互和前、后端之间信息交互；

b) 前、后端之间采用无线通信作为区域主干传

输手段，用于指令、参数、语音、视频等测发业务传输，通过数据源端加密或接入密码机等手段保障测发信息在无线环境中传输的安全性；

c) 根据使用需求，后端部署卫星通信设备，实现火箭机动发射区域与远域指挥中心之间信息交互；

d) 基于SDN架构对全网资源进行统一管理，动态感知入网终端和各链路通信质量，计算端到端传输路径。

为了保证前、后端主干传输的可靠性，一般在前、后端之间设计不少于2路相互独立的无线传输链路，如图1所示，无线传输设备1、2和无线传输设备3、4构成互为冗余的传输信道。系统分别对2路信道实时进行链路质量探测，周期性统计2路信道延时、丢包等指标，确定信道传输质量较优的为主信道，信道传输质量较差的为备信道，主、备信道根据当前2路信道传输质量实时切换。

前、后端传输采用基于软件定义的数据转发控制机制，支持自定义协议和定制化转发策略。系统根据不同类型测发业务QoS需求，对测发业务进行等级划分并制定对应传输策略，生成转发表（简称流表）并下发，完成无线通信资源实时调度和按需调度。在发送端，汇聚交换机汇合各业务数据，根据业务等级和当前各信道质量，按照提前下发的转发策略调度业务数据通过相应信道传输至对端；在接收端，汇聚交换机接收通过无线信道传输的数据，并将业务数据转发至各用户终端。当业务需求、信道特征发生变化时，系统重新制定转发策略，生成新的流表下发，后续进入系统的测发业务将按照新的流表进行匹配和转发。

### 2.2 测发控功能子系统

#### 2.2.1 供配电功能子系统

供配电是测发控系统的重要功能，在测发流程中按照测发程序对地面和箭上设备加电、断电，为设备提供工作所需的一次电源。从用电负载上看，供配电子系统主要包括两部分工作，一是在测试和射前为前端地面设备供电；二是在模拟飞行总检查中，模拟断电后箭上电池供电。

考虑到供配电功能对测发流程的关键作用，为了提高发射可靠性，地面电源一般采用冗余热备份。主、备电源在结构上采用插箱组合形式，地面供电和箭上供电采用集成一体化设计，产品形态上侧重小型化，产品使用上注重便捷性和维护性。在测发流程中，以远控模式通过网络信号控制地面电源接通和断开，实现无人值守条件下前端地面设备的加电、断

电,提高测发的灵活性。同时,能够保证在大吨位火箭热发射环境下地面电气产品的安全性。

### 2.2.2 测控功能子系统

测控功能主要包括有线测控和无线测控两部分。有线测控主要完成测发过程中供配电、关键参数采集和发射流程控制等功能,以前端集成化的测控装置为核心控制单元,采用PLC逻辑控制+开关控制方案,配合地面电源完成箭上母线的供配电,采集电压、电流、箭上和地面设备的关键状态信号,输出关键测发动作的控制信号。

无线测控主要完成测发过程中箭上遥测数据的无线接收、解调以及外安的测试等功能。解调后的数据通过网络发送至数据处理子系统。以前端测控一体机为核心,采用模块级冗余热备方案,在提高可靠性的同时实现产品小型化。

### 2.2.3 数据处理与监测功能子系统

测发过程中的监测数据和测发判读数据以无线数据和有线数据两种形式传递。无线数据以箭上遥测数据为信息源,对全箭各系统和设备的状态、指令发送和动作执行等进行全面遥测。测发过程中,监测软件对关键数据进行自动化呈现和判读,各岗位人员根据所属专业自由选择监测模块。对于母线电压、测发关键状态信息,进行冗余采集并以有线方式下传监测,提升射前关键参数传递的有效性,提高火箭发射可靠性。

## 3 商业化测发系统设计关键技术

### 3.1 工作流程设计

#### 3.1.1 并行测试

商业火箭在工作流程设计上以提高测发效率、提升火箭快速履约能力为目标,采用系统解耦+测试整合的技术途径,提升火箭测发准备效率。

在系统解耦方面,将射前各系统实现的功能进行模块化分解,并梳理各工作的交联关系。将发射流程划分为若干工作阶段,通过关键节点的设置,保证全系统工作的逻辑闭环。将解耦后的工作安排在各工作阶段并行开展,优化发射流程,提升发射效率。

在测试整合方面,在保证测试覆盖性的前提下应尽量减少测试项目,缩短测试时间。充分分析火箭测试和发射的各工作剖面,提出各阶段的主要测试目标和内容。在火箭出厂测试阶段,主要检查各系统总装后的功能实现和系统间协调匹配性。例如,对系统总装后的极性、发动机喷管的动作等实现情况进行验证。在发射场各工作阶段,主要针对本阶段技术状态

变化的产品和关键状态进行测试验证,不再重复开展测试。同时,将传统测试项目进行整合,通过并行测试提升测试效率。

#### 3.1.2 自动判读控制

测发过程中尽量减少人工干预,对于系统和设备的状态信息,以自动判读并进行流程控制为主,以人工监测判读为辅,提高测发控系统的自动化和智能化。

对于关键参数和控制指令,采用设置自动判据、超时时间、自动重传等方式,进行软件流程自动控制,提高流程控制效率。当软件层面上判断系统测发出现故障时,以显著的标识提示岗位人员进行必要的处置。对于发射必保参数,监测软件进行图形化显示和判据的自动判读。当出现超差情况时,显示告警信息,提示岗位人员关注、处理。同时,对关键周期性必保参数,以自动化手段对超差数据进行综合分析,为发射可行性提供直接的数据支撑。

### 3.2 系统集成设计

#### 3.2.1 以“商”助“商”通用硬件采购+专用软件研发

传统航天研制模式下,单机以定制研发为主,从元器件、原材料备料到单机生产及试验,齐套周期一般需要半年,且单机成本难以控制。一般情况下,测发控系统大部分单机属于信息类产品,通过应用软件实现火箭测发特定功能。本文面向商业应用提出“通用硬件采购+专用软件研发”的测发控系统研制路线,即硬件设备尽量用产品通用化采购代替定制化研发,系统研制重点为定制化软件开发。采用以“商”助“商”的思路,选用市场上运用成熟、齐套方便、价格便宜的计算机、服务器、交换机、音视频终端等通用信息系统产品代替传统自研加固设备,优化配套数量和使用模式,在降低系统研制成本的同时能够缩短系统齐套时间。另外,通用采购的优势还在于市场上可替换品充裕,不需要提前储备大量备品,并可随电子产品更新同步升级。

针对需要研制的功能产品,采用“硬件产品化+软件平台化”设计理念。硬件方面,整合需求并统一接口,实现设备/模块多型号复用,如测控组合、电源配电设备等。软件方面,整合流程和通用功能,研发测发流程指挥软件平台,依托少量代码修改和参数加载可适配不同型号。通过上述方法,能够提高系统研制效率,降低研制成本和维护成本。

#### 3.2.2 多功能集成信息平台

测发控系统采用地面一体化设计,前、后端分别设计可移动式方舱,提供电气设备集中部署空间和人

员操作空间。其中，前端为发射控制舱，集成地面测发控功能；后端为指挥控制舱，集成流程指挥、远程控制、信息融合、综合保障等功能。测发控系统方舱支持整舱交付、整体运输和吊装，具有灵活部署特点，能够快速展开、工作及撤收，提高系统响应速度，朱雀二号、长征六号、捷龙三号等运载火箭的前、后端均采用了集成方舱设计<sup>[6-7]</sup>。

方舱设计需要考虑舱体结构、操作性和维护性、自主生存性等因素。根据使用需求，可选用标准方舱或按需定制方舱。标准方舱满足公路、铁路运输要求，但舱体高度和宽度受限，可能存在设备和人员拥挤问题。定制方舱的尺寸不受限制，可以保障较舒适的操作空间，但若超过陆运规定尺寸则在运输上存在一定困难，远距离运输只能依靠海运。扩展方舱可在一定程度上缓解标准方舱宽度不足的问题，舱体收拢状态可正常运输，如长征六号运载火箭后端方舱<sup>[6]</sup>。

以某型发射控制舱为例，如图2所示，采用9 m标准舱设计，部署在总装厂房和海上发射平台，满足火箭测试和发射使用。方舱布局如下：

- a) 舱内两侧为设备区域，分别部署2个设备机柜并预留维修通道，中部为操作区域，包含1个工作门和4扇观察窗，部署2个双人操作台、3个翻转座椅、2个翻转桌、1个储物柜等，顶部安装摄像头，远程监控设备运行状态；
- b) 舱内一侧部署1个配电机柜，外部引接AC 380 V电源，内部有AC 220 V供电，并为关键设备提供UPS供电保护；
- c) 舱外侧壁部署天线升降机构和登舱梯，舱壁开设电源接口窗和信号接口窗，用于舱内外连线，舱外顶部部署摄像头，监控方舱周围环境。



图2 发射控制舱

Fig.2 Launch control cabin

### 3.3 系统可靠性设计

商业应用测发控系统中，商业采购设备多数选用工业或企业级元器件，虽然在功能、性能上能够满足型号应用，但存在可靠性不高、环境适应性不足的风险，尤其是在远距离运输和海上使用等场景下。因此，如何保障系统可靠性是商业化测发控系统需要解决的难题。

传统航天研制模式下，主要通过提升单机可靠性来提高系统可靠性。该方法是一种提升系统可靠性的有效手段，然而其研制成本较高，且常常伴随大量试验验证，并不适用于大量使用商用设备的系统。本文面向商业应用，将“提高单机可靠性”转换为“提高系统可靠性”，通过多维度冗余设计，解决商用设备可靠性不高的问题，采用设备级、软件级、链路级、架构级“四级”冗余，通过多手段协同组网和故障快速切换保护功能，实现系统灵活自愈。

- a) 设备级冗余：对汇聚交换机、流程控制计算机、测控解码模块等重要单机设备采用热备冗余设计，支持主、备机切换使用或主、备机同时工作生成2路冗余输出；
- b) 软件级冗余：对关键流程控制软件和重要数据处理软件采用热备冗余设计，支持主、备软件切换；
- c) 链路级冗余：通过冗余交换机、冗余通信设备，构建具备冗余路径的通信网络，依据设备优先级、信道质量等，划分为主、备路径，实现端到端多路径传输和故障模式下路径快速切换保护；
- d) 架构级冗余：无线测发控系统前、后端之间设计至少2条独立的无线通信链路，二者工作在不同频段，有效应对频率选择性衰落，提高系统的抗干扰能力和无线电磁环境适应能力。

基于上述可靠性设计，系统可靠性可建模为串并系统形式，可靠性模型如图3所示。

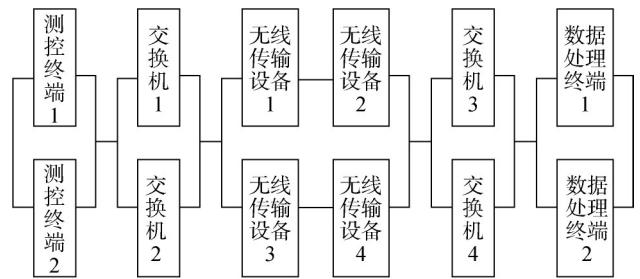


图3 测发控系统可靠性模型

Fig.3 Reliability model of test and launch control system

根据可靠性串并模型,系统可靠性为

$$R = \prod_{i=1}^6 R_i \quad (1)$$

$$R_i = 1 - (1 - R_{ii})^2 \quad (2)$$

式中  $R$  为系统可靠性;  $R_i$  为单机冗余后可靠性;  $R_{ii}$  为各功能单机可靠性。假设各单机可靠性指标为 0.99, 该指标是多数商用设备均可达到的可靠性指标, 则系统可靠性指标为 0.999 4, 满足系统可靠度不低于 0.998 的要求。

针对环境适应问题, 本文将“个体适应”转换为“一体防护”。依托集成方舱, 在舱内统一部署空调、除湿机等环控设施, 保障舱内设备对高低温、潮湿等自然环境的适应性; 为机柜、方舱安装减振装置, 保障舱内设备对公路、海路长途运输过程中振动环境的适应。采用上述措施后, 有效解决了商用设备环境适应性不足的问题, 同时避免了单机环境适应性设计, 控制了试验成本, 实现了可靠性与经济性的平衡。

与传统定制单机相比, 采用系统可靠性设计和一体化防护后, 在保证系统可靠性的基础上, 使用商业采购设备减少了单机定制研发过程中采取的元器件筛选、结构加固、环境试验考核等环节, 结合批量采购, 可以有效降低系统研制成本。据统计, 单套系统节约成本超过二分之一, 并且单机齐套周期平均在 2 个月之内, 实现了测发控系统研制经济高效的目标。

## 4 测发控技术发展趋势

### 4.1 箭地功能集成化

随着电子技术的不断发展, 未来火箭在设计上将更加关注自测试、强化箭测, 地面测试的功能逐步向箭上转移。可重复使用的锂电池在火箭上的广泛应用, 使得测试和射前箭上设备的供电对地面电源的依赖性越来越小。基于以上发展趋势, 箭地功能更加集成化, 地面测发控系统将进一步简化。定制化产品的功能逐步由箭上单机实现, 地面测发控系统将更加通用化。

### 4.2 远程辅助测发

远程辅助测发系统是一种用于火箭异地协同作业的集中式信息融合处理系统, 基于高速网络通信, 打通发射场、总装厂与远程支持中心之间的链路, 将火箭各阶段测试数据回传共享, 利用远程支持中心强大的计算能力和大数据平台, 能够快速融合火箭测试数据, 分析得出判读结果, 在异常时给出故

障处置措施并及时反馈。目前, 远程辅助测发系统已经实现各陆地发射场与远程支持中心互联互通, 支撑了空间站建造、探月、探火等多项工程火箭发射任务<sup>[8]</sup>。

### 4.3 低成本测发模式

随着技术的进步, 测发控系统正朝着更低成本的方向发展。例如, 通过使用标准化的硬件组件, 减少定制化设计的成本; 采用先进的软件算法, 减少人力成本, 提高自动化程度。

### 4.4 可回收火箭的测发控

用于可回收火箭的测发控系统, 不仅需要支持火箭的发射, 还需要快速评估火箭回收后的状态, 确保火箭能够快速修复和再次使用。这要求测发控系统具有更高的灵活性和适应性, 能够在短时间内完成复杂的测试和评估流程。

### 4.5 先进技术的应用

未来, AI 和机器学习技术将被广泛应用于测发控系统中, 通过智能算法实现故障的自动检测和预判, 提高系统的可靠性和安全性。同时, 利用云计算和大数据技术, 可以实现对火箭发射数据的实时分析和处理, 为发射决策提供科学依据。

## 5 结束语

随着商业航天市场迈入快速发展期, 运载火箭商业发射对测发控系统设计及应用提出了新的需求。本文在介绍运载火箭测发控系统发展现状及常用测发模式的基础上, 提出了一种新型陆海通用测发控系统设计, 梳理了商业发射模式下测发控系统设计的关键技术, 为后续商业运载火箭测发控系统设计提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] 李立群, 李成, 韩秀利, 等. 运载火箭海上发射运用样式研究[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2023(5): 60-66.  
LI Liquan, LI Cheng, HAN Xiuli, et al. Research on the application style of rocket sea launch[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(5): 60-66.
- [2] 王子瑜, 范瑞祥, 程堂明, 等. 中国新一代中型运载火箭地面测发控系统架构及发展方向[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(2): 91-97.  
WANG Ziyu, FAN Ruixiang, CHENG Tangming, et al. The architecture of test and launch control system in Chinese new generation launch vehicle and development directions[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(2): 91-97.

- [22] 张婧怡. 航天产品生产制造领域中虚拟现实技术的研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.  
ZHANG Jingyi. Research and application of virtual reality technology in aerospace product manufacturing field[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [23] 夏准. 基于人因工程的复杂系统装备虚实融合装配与运维仿真系统设计及开发[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.  
XIA Zhun. Design and development of simulation system for the virtual-physical integration assembly and operation and maintenance of complex equipment based on human factors engineering[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.

### 作者简介

- 龚林辉 (1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为结构总体及分离总体设计。
- 王 腾 (1990—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为数字样机技术及仿真。
- 高利军 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为型号总体设计。
- 王 晨 (1984—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为数字化总体设计。
- 刘 伟 (1980—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为型号总体设计。

(上接第98页)

- [3] 王子瑜, 胡钰, 彭越, 等. 运载火箭地面测发控系统架构研究[J]. 测试技术学报, 2023, 37(3): 185-193.  
WANG Ziyu, HU Yu, PENG Yue, et al. Research on architecture of test and launch control system in Chinese launch vehicle[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(3): 185-193.
- [4] 吕明, 司群英, 侯彦娇, 等. 基于国产网络设备的火箭地面测发控网络平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(10): 54-57.  
LYU Ming, SI Qunying, HOU Yanjiao, et al. Design of rocket measure-launch-control-platform on ground based on domestic network equipments[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(10): 54-57.
- [5] 赵心欣, 张宏德, 静广宇, 等. 基于VSS及SSM的运载火箭地面测发控网络系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(12): 19-22.  
ZHAO Xinxin, ZHANG Hongde, JING Guangyu, et al. VSS and SSM based ground test and control network system for launch vehicle[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(12): 19-22.
- [6] 高飞, 徐玮, 汪灏, 等. 快速发射运载火箭测发控方舱列装化设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 62-68.  
GAO Fei, XU Wei, WANG Hao, et al. Study on fitting out design of fast launch vehicle measurement-launch and control shelter[J].

Computer Measurement & Control, 2022, 30(5): 62-68.

- [7] 徐昕, 高飞, 韩秀利, 等. 快速机动发射运载火箭测发控系统的设计分析与展望[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(10): 120-124.  
XU Xin, GAO Fei, HAN Xiuli, et al. Analysis and prospect of test launch control system design scheme of fast maneuvering launch vehicle[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(10): 120-124.
- [8] 何巍, 牟宇, 朱海洋, 等. 下一代主力运载火箭发展思考[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(2): 1-12.  
HE Wei, MOU Yu, ZHU Haiyang, et al. Reflections on the development of next generation main launch vehicle[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(2): 1-12.

### 作者简介

- 王 芳 (1988—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为指挥信息系统设计。
- 齐 欢 (1989—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭电气系统总体设计。
- 刘 伟 (1980—), 男, 研究员, 主要研究方向为运载火箭总体设计。
- 孙立猛 (1998—), 男, 工程师, 主要研究方向为指挥信息系统设计。